

分岐による流量分配に関する研究

原 田 正 一

Investigations on Dividing Flow by Bifurcations

Masakazu HARADA

Synopsis

In a branching or bifurcation of fluid flow duct, the divided flow rates in the two downstream channels are influenced by the combination of angles, local shapes of splitter edge and downstream loads. In this paper, experimental results are discussed on the bifurcated water flow in rectangular cross section channels of 1 cm^2 area. Not only the combination of angles 10° – 30° , 10° – 50° and 20° – 50° but also the effect of the local shape modification as shown in Fig. 1 are examined. The divided flow rates are also influenced by Reynolds number and pulsation. Low Reynolds number flow results approximately equal the flow rates in both legs of different angle bifurcations.

In the second part of this paper, a method to control the flow dividing ratio is presented. Flow rate is controlled by inserting a control plate into the flow passage from one side of the wall of rectangular channel in bifurcating area. The effects of control plates are measured in an equiangular bifurcation. The calculated values by a flow deflection model are compared with measured values in Fig. 17 when $d_e=0$. The tip position of the plate $e/b=0.2$ can deflect all the flow to either of the two channels.

1. 緒 言

分岐における流れの分配については、R. Rosen¹⁾による血管の最適分岐など、機械的な分岐以外の研究も多い。また、Y字形分岐管の両側折れ曲り部分にゴムの中空室を作りつけ、ゴム室の内圧を低下させたときの変形により流量分配率を制御する手法が実用化されている。

また、正方形断面流路において、ノズルと分岐の間の側面にあけられた制御口を閉じることによって、流れを一方の分岐に切換えるダイバータ²⁾が作られ、わが国においても鋼板圧延時の温度制御に使われている³⁾。ノズルの代りにオリフィスを用いる設計も実用化されている⁴⁾。

ここでは、正方形断面流路の分岐において、分岐角と分岐形状が流量分配に及ぼす影響を実

験により調べた。流量分配については、分岐下流の抵抗の影響、レイノルズ数の影響ならびに脈流の影響も調べられた。つぎに、等角分岐を用いて流量分配率を制御する方法として、分岐付近側面から邪魔板を出した場合の実験例を示す。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験方法の概要

実験には水道水を使用した。水はポンプにより定水頭タンクに送られ、流量調節弁を経て測定部に至る。流路は辺長 1 cm の正方形断面とし、分岐の上流と下流にはそれぞれ一様断面の流路が 20 cm あって、下流端は開放されている。ただし、負荷抵抗が流量分配に及ぼす影響を測定したときには、分岐の下流側を切断した。

分岐部の流れの状態は、ポリスチレン粒を混入して観察した。また、脈流の実験は空気圧の振動を、分岐上流に設けた液面に加えて作った。圧力変化を記録し、振幅と周波数を変えてそれらの影響を調べた。

流量の測定には重量法を用いた。等角分岐の場合に、水平に設置して流量が等分されることを確かめた。

2.2 分岐部の形状

実験に用いた分岐の形状を Fig.1 に示す。不等角分岐においては、上流の流路となす角度の小さい側を α 、流量を Q_1 、分配率を Q_1/Q_0 で表わす。これに対し、大きい側の角度を β 、流量を Q_2 で表す。

分岐部の形状はつぎのような方法で変化させた。まず、角 $\alpha + \beta$ の 2 等分線と直角に分流壁の先端を切り落とす手法でその寸法に C という記号をつけて示した。つぎに分流壁先端に中心をおく円弧で切り取る手法と、前記した角 $\alpha + \beta$ の 2 等分線に直角な線分を直径とする半円によりへこみを作る手法とを実験した。前記の直線切断に対し、これらを円弧切断および半円切断と呼び、それぞれ半径と直径とを R 、および ϕ という記号により表わした。

これらと同様の切り落としは、純流体素子において一方向に制御された流れが、他の分岐へ流出することを防ぐために使われている。ここでは、単純な分岐においてどのような効果が得られるかを調べた。

2.3 流量分配制御のための実験

Fig.2 には、 20° の切落しのない等角分岐を用いて流量分配を制御する方法として、流路に邪魔板を突出させた場合の配置を示す。上流側の邪魔板だけでも、等量分配から全流量を一方へ流出させるまでの制御が可能で、位置 d_f によっては a/b の値が 0 から 0.2 以内で制御できる。したがって、反対側にも邪魔板を置くことにより、0 から 100% までの制御が可能となる。

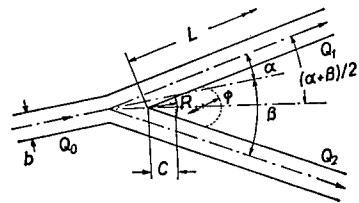


Fig.1 Shape parameters in experimental bifurcations

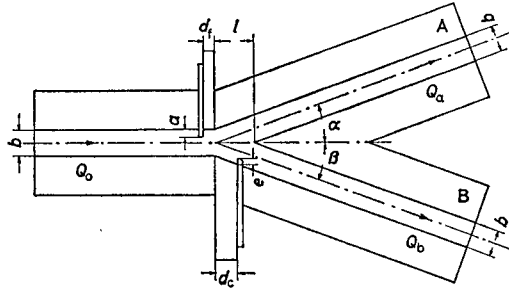


Fig. 2 Control plates in an equiangular bifurcation

分岐の上流 d_f の位置に固定板をおき、流れを全部Bの側へ流出させておく。つぎに分岐下流 d_c の位置に制御板を出して、先端の突出長さ e に対する流量分配率の変化を測定した。ただし、邪魔板により流路断面積が縮小するため、流量はわずかながら減少する。

実験はまず分岐部の上流 $d_c/b = -0.6$ から、下流 $d_c/b = 1.4$ までの範囲で、単独の邪魔板による流量分配の変化を測定した。板の突出方向は、分岐上流の流路に対して直角とした。

つぎに、上流側の邪魔板により一方の分岐へ全流量を流出させておき、この板を固定した。この状態で、下流側の制御板の突出長さ e に対する流量分配を測定した。上流側の板の位置 d_f/b は0から -0.6 まで、下流側は d_c/b を0から12までとし、相互の位置の組み合わせについて測定した。

3. 実験結果とその考察

3.1 不等角分岐による流量分配

Fig. 3 に $10^\circ - 30^\circ$ 分岐の場合の流量分配の測定値を示す。分岐下流の流路長さ L を減らしていくと、 $\alpha = 10^\circ$ の側の流量は増し、 $\beta = 30^\circ$ の側は減少する。下流長さが0のときの分配を測定することはできないが、理想上の分配は上流の流れがそのまま直進して分流壁先端で分けられると仮定すれば次式で表わされる。

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{1 - \frac{1}{2} \tan \alpha \left(\tan \frac{\beta}{2} - \tan \frac{\alpha}{2} \right)}{1 + \frac{\tan \alpha}{\tan \beta}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{Q_2}{Q_0} = \frac{1 + \frac{1}{2} \tan \beta \left(\tan \frac{\beta}{2} - \tan \frac{\alpha}{2} \right)}{1 + \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

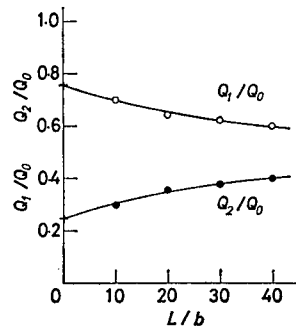


Fig. 3 Effect of downstream length to flow dividing ratio in $10^\circ - 30^\circ$ bifurcation

計算値は Fig. 3 の測定値の延長線上にある。

Fig. 4 には、全流量 Q_0 に対する Q_1 および Q_2 の測定値を示す。定常流と 2.4Hz の脈流とを比較して示しているが、 Q_1 と Q_2 とが一定の比率で分配されているわけではなく、共に

流量によって変っている。流量が減少すると Q_1 と Q_2 の差は減少し、 $Q_1 < Q_2$ と大小関係が逆転した測定値が現われている。

Fig.5 には、 10° – 30° の場合について分流壁先端部形状の影響を示す。先端を $c/b=1$ および 2 と切り落としていくと、流量 Q_1 と Q_2 の差は大きくなる傾向を示している。ただし、直線切断 $c/b=2$ と円弧切断 $R/b=1.16$ および半円切断 $\phi/b=1.06$ の場合とはほとんど一致した。

また、Fig.4 では流量 40g/s、Fig.5 では 20g/s のあたりで流量分配の傾向に変化があらわれていることがわかる。この流量はレイノルズ数 2 ないし 4×10^3 、すなわち乱流移行の状態に対応している。

Fig.6 には、 20° – 50° 分岐において、分流壁先端部を直線切断したときの流量分配を示す。 $c/b=1$ の場合には流量差が増加しているが、 $c/b=2$ になるとかえって流量差が減少している。円弧ならびに半円切断でも同様の傾向を示す。分岐角が大きい場合には c/b が大きくなると、切り落とした分岐部がよどみ領域になって、分岐角の影響が減少することも考えられる。

20° – 50° の分岐に 1.2Hz と 2.3Hz の脈流を流したときの測定値を Fig.7 に示す。振幅は平均流量の半分程度である。この場合、脈流は定常流よりも Q_1 と Q_2 の差を大きくするよ

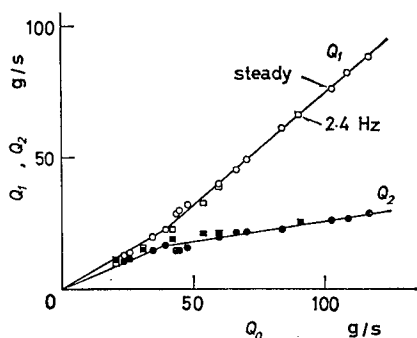


Fig.4 Divided flow rate by 10° – 30° bifurcation

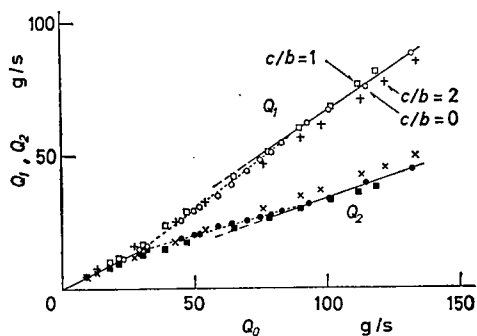


Fig.6 Effect of local shape to divided flow rate in 20° – 50° bifurcation

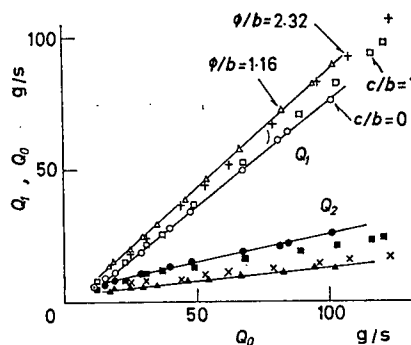


Fig.5 Effect of local shape to divided flow rate in 10° – 50° bifurcation

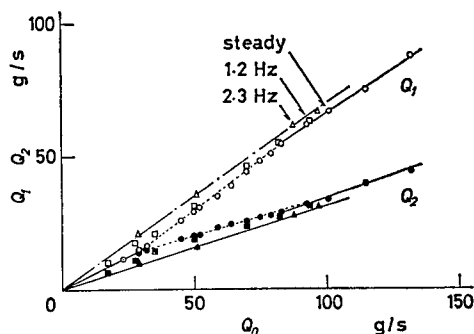


Fig.7 Divided pulsating flow in 20° – 50° bifurcation

うに作用している。また、定常流でレイノルズ数 2 ないし 4×10^3 に現われた乱流移行にともなうとみられる変化は、脈流では認められない。ただし、脈流の影響は分岐角の組合せによっても異なっている。

Fig. 8 には、 $10^\circ-30^\circ$ 、 $10^\circ-50^\circ$ および $20^\circ-50^\circ$ について、レイノルズ数の影響をまとめて示す。レイノルズ数の増加と共に Q_1/Q_0 が増加している。低レイノルズ数では等流量分配に近づいている。また、 $10^\circ-50^\circ$ と $20^\circ-50^\circ$ においては $Q_1 < Q_2$ となるいわゆる分配の逆転が測定されている。

Fig. 9 には、分流壁を $c/b=1$ だけ直線切断した場合の、分配率に対するレイノルズ数の影響を示す。Fig. 8 と同様に、レイノルズ数の増加と共に Q_1/Q_2 が増加する傾向を示している。また、一部には $Q_1 < Q_2$ の測定値が見られるが、低レイノルズ数ではほぼ等分されており、乱流とみられる領域では $Q_1 > Q_2$ の分配が行なわれている。

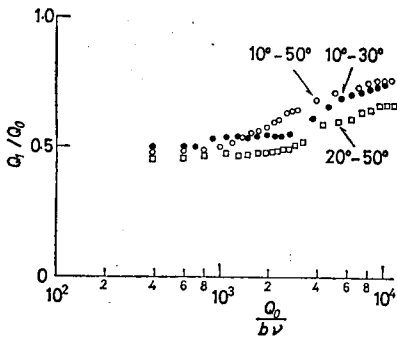


Fig. 8 Effect of Reynolds number on flow dividing ratio

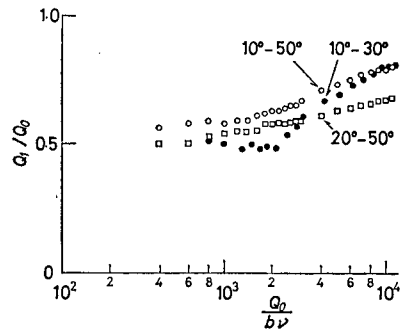


Fig. 9 Effect of Reynolds number in $c/b=1$ bifurcation

3.2 邪魔板の突出による流量分配の制御

(1) 単一の邪魔板による分配の変化

20° の切落しのない等角分岐の折れ曲り点に片側から邪魔板を突出させたときの、流量分配の変化を **Fig. 10** に示す。初期の状態において等分されていた流れは、邪魔板の突出により反対側の分岐へより多くの流量を分配するようになる。邪魔板の突出によって流路の断面積は局部的に縮小するが、 $d_c=0$ の場合には、下流が片側 20° の拡大流路となっているので、断面積の縮小がそのまま流量を減少させることにはなっていない。邪魔板の突出長さが増すと、流量はわずかながら減少している。

Fig. 10 の場合、一方の分岐からの流出流量は邪魔板の突出長さ e とほぼ比例して変化している。図に破線で示したように、反対側から邪魔板を突出させることにより、分配率を任意の値に調節することが可能となる。

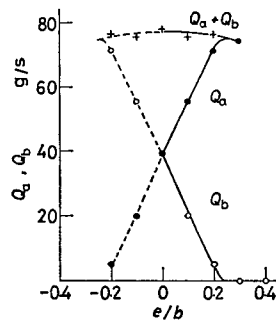


Fig. 10 Divided flow rate by a control plate at $d_c=0$

邪魔板の位置を分岐の上流 $d_c/b = -0.4$ に移すと, $e/b = 0.1$ で全流量を一方の分岐へ流出させることができる。ただし, さらに上流へ移すと, 邪魔板により偏向した流れは, 板の下流に生じたはく離域の負圧によって引き戻され, 邪魔板の効果は弱まる。

邪魔板の位置を分岐点の下流へ移したときの流量分配を **Fig. 11** に示す。 $d_c/b = 1$ の位置に邪魔板を置いた場合で, 全流量を偏向させるには $e/b = 0.8$ 程度の突出が必要となる。また, $e/b < 0.32$ では, わずかながら $Q_a < Q_b$ となる流量分配の逆転が起っている。この現象は, つぎのように説明できる。

20° という分岐の角度は, 噴流の拡散における広がり角 7° ないし 10° より大きい。したがって, 分岐部の外側の側壁と流れとの間に渦流れを伴うよどみ領域が生じている。この領域に邪魔板を出して渦の逆流を阻止すると, 主流の巻き込みによる圧力降下を助長することになり, 主流を引き寄せる結果となる。邪魔板が逆流の領域を越えて主流の中へ突出すると, 流れを引き寄せる作用は消えて, 主流は押しのけられる。

邪魔板の位置をさらに下流に移すと, 板の先端が分流壁の先端に近づいたときに一方向への流出が可能となる。**Fig. 12** には, $d_c/b = 1.4$ の測定結果を示す。この位置は分流壁先端に近いので, $Q_b = 0$ となるのは $e/b = 1$ である。ただし, 流路に 20° の角度があるため, 片側の流路を遮断するのは $e/b = 1.06$ で, そのとき板の先端は分流壁先端の上流 $0.37b$ の位置にある。

$e/b < 0.2$ では流れに対する影響は小さい。よどみ領域が広くて, 逆流と巻き込みの影響が弱いためである。

Fig. 13 には, 邪魔板の位置と流量分配との関係をまとめて示す。上側の斜線の部分は板が対向面に接触する限界を表している。流れが全部A分岐へと流出する限界点は, 板の位置が分流壁先端より上流へ移ると共に, 手前側壁面に近づき, $d_c/b = -0.4$ 付近で極小値を示している。

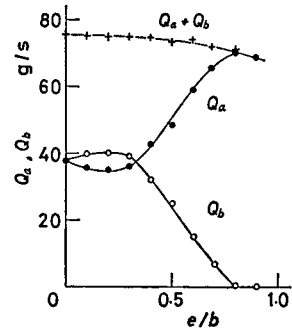


Fig. 11 Divided flow rate by a control plate at $d_c/b = 1.0$

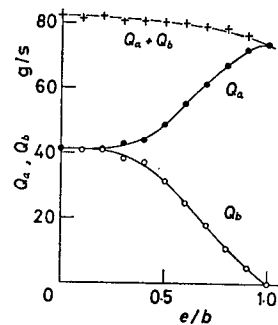


Fig. 12 Divided flow rate by a control plate at $d_c/b = 1.4$

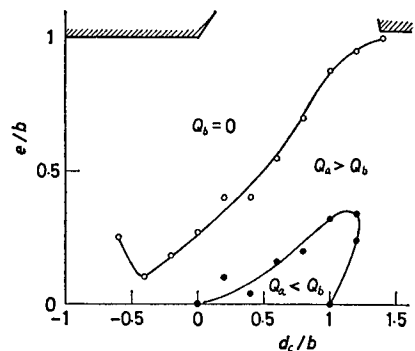


Fig. 13 Effect of control plate to flow deflection

(2) 2枚の板の組合せによる流量分配の制御

以上に記した手法では、たとえば Fig.10 に示したように、実線部分と破線部分に対応する2枚の板を調節することが必要となる。これに対し、Fig.2 に示したように、分岐上流 d_f の位置にある固定板を使って流れをすべてB分岐へ流出させておき、下流側 d_c の位置の制御板を動かすだけで分配を調節することが可能である。

この場合、 d_f と d_c の位置の組合せによって効果に違いがあると考えられるので、種々の組合せについて実験した。Fig.14 には、 $d_f/b = -0.6$ に設定したとき、 $d_c/b = 0$ および 0.4 の場合の流量分配の変化を比較して示す。固定板の突出長さは $a/b = 0.3$ である。 $d_c/b = 0$ の場合には e/b が 0 から 0.2 の範囲でB分岐からA分岐へと流れを変えることができる。これに対し、 $d_c/b = 0.4$ の場合には、変化が始まる位置が $e/b = 0.09$ で、それから 0.4 までの間で流量分配率が変化している。

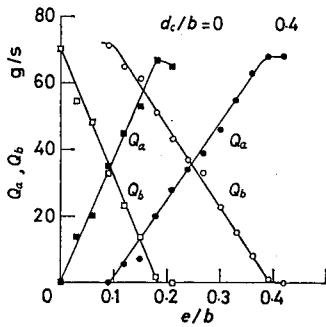


Fig.14 Effect of control plate with fixed plate at $d_f/b = -0.6$

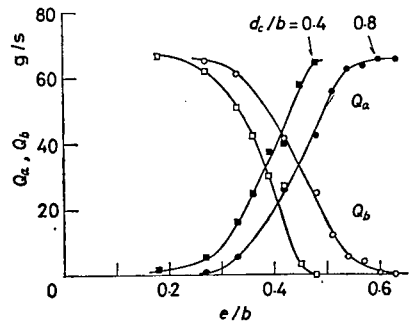


Fig.15 Effect of control plate with fixed plate at $d_f/b = -0.2$

Fig.15 には、 $d_f/b = -0.2$ 、 $a/b = 0.3$ の場合における、 d_c/b が 0.4 と 0.8 のときの測定値を示す。相互に傾向が似ており、Fig.14 の場合より直線性が劣っている。また変化が始まる位置も遠くなっている。

以上の場合に共通して、 $Q_b = 0$ となったときの全流量 Q_0 の減少の程度は、 $d_f = 0$ のときを除いて 5% 以下であった。また、履歴効果、振動などの現象は観測されなかった。

(3) 流量分配率の計算

分岐部側面の折れ曲り点 $d_c = 0$ の位置に単一の邪魔板を突出させると、板による圧力上昇にもとづく横方向の力によって流れは偏向する。偏向した流れが分流壁によって分けられることによって、流量分配率が変化する。したがって、偏向流のモデルを設定することにより、流量分配率を計算することができる。

側壁面が折れ曲る分岐の基準点から、分流壁先端までの中心線方向の距離 l は、図形からつぎのように表わされる。

$$\frac{l}{b} = \frac{2 - \cos \alpha}{2 \sin \alpha} \dots\dots\dots (3)$$

板の突出長さ e と横方向へ向う運動量成分 J_e との間につぎのような比例関係を仮定する。

$$\frac{J_e}{J} = \frac{e}{b} \quad \dots\dots\dots(4)$$

流れが運動量 J_e によって偏向した方向にそのまま進むならば、邪魔板のある側の流れが分流壁の先端で切られるまでの幅は

$$s = \frac{b}{2} - e - \frac{J_{el}}{J} \quad \dots\dots\dots(5)$$

で表わされる。流れの傾きを考慮し、等分されている初期流量との比をとって表わす。

$$\frac{Q_b}{Q_{b0}} = \frac{s}{b} \cos \frac{J_e}{J} \quad \dots\dots\dots(6)$$

(6)式に(3), (4), (5)式を代入して次式を得る。

$$\frac{Q_b}{Q_{b0}} = \left\{ \frac{1}{2} - \frac{e}{b} - \frac{2 - \cos \alpha}{2 \sin \alpha} \cdot \frac{e}{b} \right\} \cos \frac{e}{b} \quad \dots\dots\dots(7)$$

(7)式による計算値と、 $d_c/b=0$ ならびに $d_f/b = -0.6$, $d_c/b=0$ の場合の測定値とを比較して Fig. 16 に示す。

後者は全流量が初期状態では制御板の出る側へ流出している場合であるが、変化の傾向は同様である。Fig. 16 では $e=0$ のときの流量を Q_{b0} として比較した。固定板がある場合には、分岐上流の流れは固定板によって偏向されているので、制御板へ衝突したときの運動量成分 J_e の大きさは、固定板が無いときよりもいくらか大きくなると考えられる。このため Fig. 16の流量変化は、計算値よりも大きくなっている。

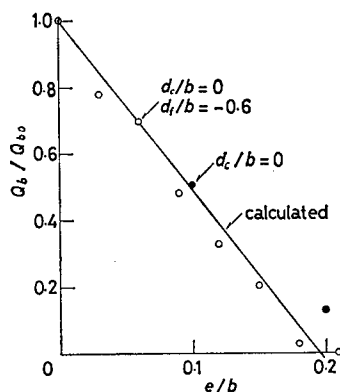


Fig. 16 Comparison between the measured values and the calculated by a flow model of $d_c=0$

4. 結 言

分岐における流量分配に及ぼす基本的な因子の影響を実験的に調べた。その結果つぎのような現象が観測された。

- (1) $10^\circ-30^\circ$, $10^\circ-50^\circ$ および $20^\circ-50^\circ$ の3種の不等角分岐を用いて、流量分配に及ぼす分流壁先端部の形状の影響を調べた。先端部を両側の分岐流路と等角度で交わるように切り落した場合、流量の分配は基本形状のときよりも差が大きくなる傾向を示した。
- (2) レイノルズ数が小さいときには、流量は形状にかかわらずほぼ等分される。
- (3) レイノルズ数が2000ないし4000を越すと、分岐角の小さい側の分配率が増加して、レイノルズ数の増加と共に一定値に近づく。また、脈流もこの傾向を助けるように作用する。
- (4) 20° の等角分岐において、流路の側面より邪魔板を突出させた場合の、板の位置による効果の違いを調べた。分岐のわずかに上流側が最も大きな効果を示した。また、分岐点のわずかに

下流側では、邪魔板の突出により流れを引き寄せる現象が観測された。

- (5) 分岐上流側の邪魔板により流れを一方の分岐へ流出させておいて固定し、下流側の邪魔板を動かして流量分配を変化させた場合の、2板の位置の組合せによる効果の違いを調べた。

この研究は、昭和51・52年度において明治大学科学技術研究所の重点研究の一部として実施された。

記 号

- A ; 制御板により流量が増す側の分岐
 a ; 固定板の突出長さ
B ; 制御板により流量が減る側の分岐
 b ; 流路幅
 c ; 分流壁先端の切り落とし寸法
 d_c ; 制御板の位置
 d_f ; 固定板の位置
 e ; 制御板の突出長さ
 f ; 脈流の周波数
 Q_0 ; 全流量
 Q_1 ; 分岐角が小さい側の流量
 Q_2 ; 分岐角が大きい側の流量
 Q_a ; 分岐Aの流量
 Q_b ; 分岐Bの流量
 R ; 分流壁先端のへこみの半径
 α ; 分岐Aの分岐角
 β ; 分岐Bの分岐角
 ϕ ; 分流壁先端のへこみの直径
 ρ ; 密度

参考文献

- 1) R. Rosen: Optimality Principles in Biology, Butterworths, 1967.
- 2) M. J. Fisher, A. Thomson: Some measurements of Liquid Wall Attachment Diverter Valve Characteristics, Proc. 3rd Cranfield Fluidics Conference (1968) Vol. 1, B4—45/64.
- 3) 西, 芝下, 陶山: フルイディック・フローダイバータへの応用, 油圧と空気圧, Vol. 9, No. 6 (1978) 351/356.
- 4) S. Bahrton: A New Type of Fluidic Diverter Valve, Proc. 4th Cranfield Fluidics Conference (1970) A4—53/60.